

AVALIAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DAS PORTAS DA CÉLULA DE TESTE COM SENSOR A ONDA ACÚSTICA DE SUPERFÍCIE A PARTIR DOS PARÂMETROS-S

Mayara Gomes Accioly¹
Yasmim de Amorim Eustáquio²
Henrique Dantas Silva³
Marlo Andrade Santos⁴
Raimundo Carlos Silvério Freire⁵

RESUMO

Neste trabalho será apresentada a medição da magnitude do coeficiente de reflexão para a célula de teste de um sensor a onda acústica de superfície. Para essa medição foi usado um sensor a onda de Love operando na frequência de 116 MHz conectado a um analisador de rede vetorial que se conecta a um computador. Para os procedimentos experimentais foi utilizado o analisador de rede vetorial NanoVNA (NanoVNA-H v3.4) conectado à célula de teste com o sensor para a determinação da resposta em frequência em termos da magnitude do coeficiente de reflexão nas quatro portas do sensor. A calibração do NanoVNA foi feita com circuito aberto, curto circuito e carga de 50 ohms. Para as medições, foi utilizada uma faixa de frequência de 100 MHz até 130 MHz (com uma largura de banda de 30 MHz), potência de emissão de 0 dBm, 5050 pontos de medição e resolução de 5,9 kHz. Pelos resultados obtidos foi constatado que existem diferenças entre as respostas de cada porta do sensor. Algumas destas características inviabilizam a utilização do sensor por este perder parcialmente a sua natureza capacitiva. As imprecisões nas medições surgem em função do deterioramento da célula de teste, de problemas decorrentes com o sensor, como desgaste ou danos físicos, por exemplo, e falhas nos cabos ou adaptadores por má conexão, tempo de uso ou qualidade do material. Portanto, a utilização da magnitude do coeficiente de reflexão é uma boa ferramenta para a verificação do funcionamento correto do conjunto contendo o sensor e a célula de teste.

Palavras-chave: sensor a onda acústica de superfície, onda de Love, magnitude do coeficiente de reflexão, verificação do funcionamento.

¹ Graduanda do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, mayara.accioly@ee.ufcg.edu.br;

² Graduanda pelo Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, yasmin.eustaquio@ee.ufcg.edu.br;

³ Mestrando do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, henrique.dsilva@ee.ufcg.edu.br;

⁴ Doutorando pelo Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, marlo.santos@ee.ufcg.edu.br;

⁵ Professor orientador: Doutor, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, rcsfreire@dee.ufcg.edu.br.

INTRODUÇÃO

A ocorrência de falhas em circuitos resulta em comportamentos indesejados, como respostas erradas e interrupção em componentes e/ou nele todo que, se forem persistentes, causam danos ao dispositivo no qual ele está inserido e, conseqüentemente, erros na medição. A detecção das falhas é essencial para que sejam realizadas manutenções, adaptações de uso ou até substituição total do equipamento. Ela pode ser feita analisando a resposta do circuito no tempo e na frequência. (BINU; KARIYAPPA, 2017) Da resposta são obtidas impedâncias, correntes, frequências, tensões, médias e desvios nas quais as falhas são observáveis. Em sensores a onda acústica de superfície, as falhas podem prejudicar a caracterização e sensibilidade do dispositivo e alterar a quantidade de sinal refletido ou transmitido (GOMBÉ; MÉROU; BRESCHI, 2019).

Dentre os sensores a onda acústica de superfície estão os sensores a onda de Love, usados para detecção de material químico ou biológico em meios gasosos e líquidos. São formados por dois transdutores interdigitados (IDT, do inglês *Interdigital Transducer*) em linha de atraso sobre um substrato piezoelétrico de quartzo com a adição de uma camada guia de dióxido de silício (SiO_2) e a detecção ocorre por mudanças nas propriedades elétricas e mecânicas do dispositivo quando adicionado material em sua superfície. (ANDRADE et al, 2022) O sensor é inserido em uma célula de testes que o protege mecanicamente e eletromagneticamente. A célula também impede o contato direto de líquidos com os eletrodos do sensor, garantindo uma boa reprodutibilidade do protocolo de medição. As medições são feitas conectando as portas da célula de testes a um analisador de rede vetorial (VNA, do inglês *Vector Network Analyzer*).

Para analisar a resposta do sensor a onda de Love, o VNA afere parâmetros de espalhamento (parâmetros-S) e os envia para um *software* de apoio por meio de uma conexão USB com um computador. Dentre os parâmetros de espalhamento, neste trabalho foi analisado o coeficiente de reflexão (S_{11}), que descreve o quanto um sinal é refletido em uma linha de transmissão. A partir da resposta do S_{11} ao longo de uma faixa de frequências, é possível obter dados de frequência de ressonância, impedâncias e reatâncias do dispositivo. (POZAR, 2011) Nos trabalhos (ANDRADE et al, 2022; RUBE et al, 2020) foram caracterizados os sensores acústicos de superfície a ondas de Love na mesma faixa de operação deste trabalho, entre 100 MHz e 130 MHz. A célula de testes presente no Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científica da Universidade Federal de Campina Grande, onde foram realizados os experimentos

desse trabalho, apresenta resultados de medições diferentes dos encontrados nas referências (SILVA et al, 2022). Portanto, testes nessas células são essenciais para garantir o bom funcionamento e a qualidade das medições.

Este trabalho tem como objetivo avaliar o funcionamento das quatro portas da célula de testes contendo o sensor a onda de Love a partir da análise da magnitude do coeficiente de reflexão (S_{11}). Inicialmente estão postos os conceitos teóricos necessários para a realização do trabalho. Na seção seguinte é apresentada uma descrição detalhada dos procedimentos experimentais realizados. Depois, são colocados os resultados obtidos com a realização do experimento e as análises para cada porta da célula de testes. A conclusão finaliza o artigo com os resultados das análises e previsões de estudos futuros para aprimoramento da pesquisa.

METODOLOGIA

O experimento foi realizado no Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científicas, na Universidade Federal de Campina Grande, na Paraíba. Sua configuração está representada na Fig. 1.

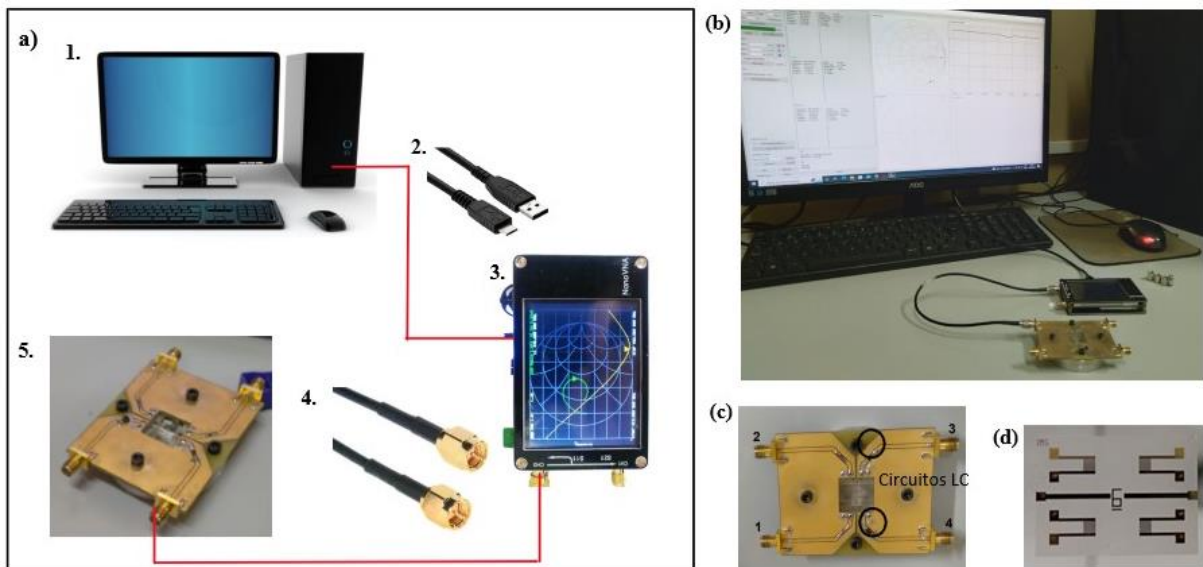


Figura 1 – Esquema de montagem do experimento em que: a) um diagrama da montagem do experimento, b) esquema prático de montagem do experimento, c) célula de teste contendo o sensor a ondas de Love com portas enumeradas e identificação dos circuitos LC e d) sensor a ondas de Love.

Fonte: Autoria própria.

Conforme apresentado na figura, um computador - 1 - foi conectado ao nanoVNA-H v3.4 - 2 - a partir de um cabo USB - 3 -. Na porta CH0 do nanoVNA foi conectado um cabo coaxial RG-174 de 30 cm - 4 -. Em seguida, foi realizada a calibração SOL (do inglês, *Short-Open-Load*) da frequência 100 MHz a 130 MHz com resolução de 5,9 kHz. Após esse processo, foi conectado o cabo coaxial ligado ao nanoVNA nas portas da célula de testes contendo o sensor a ondas de Love - 5 -. Por fim, foram realizadas 5 medições da magnitude do coeficiente de reflexão (S_{11}). A partir desses dados foram calculadas a média e o desvio padrão das medidas. Os valores médios foram obtidos pelo cálculo da média aritmética simples das medidas. Os desvios padrões foram obtidos usando a fórmula do desvio padrão amostral apresentada em (1)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}}, \quad (1)$$

em que σ é o desvio, \bar{x} é a média das amostras, x_i é a amostra atual e N é o número total de amostras.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Fig. 2 é possível observar a média da magnitude do coeficiente de reflexão S_{11} das cinco medidas para as portas 1 e 2 da célula de teste.

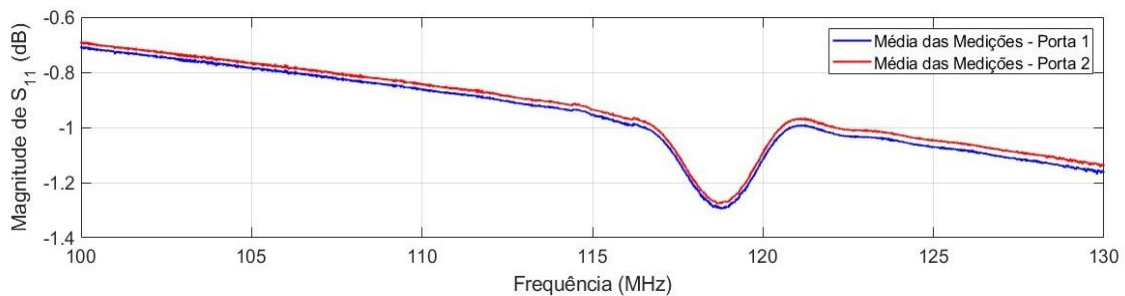


Figura 2 – Curvas da média das medições para as portas 1 e 2.
Fonte: Autoria própria.

Observando a figura é possível ver que houve boa reprodutibilidade experimental, considerando que a resposta é similar a obtida em experimentos executados nas mesmas condições. (SILVA et al, 2022) Os desvios são baixos, da ordem de 10^{-3} para todas as medições da magnitude do coeficiente de reflexão (S_{11}) na frequência de operação. Então, pode-se concluir que as medições são acuradas. É possível notar uma diferença de magnitude e frequência entre as duas portas. Idealmente, o sensor a ondas de Love é um dispositivo simétrico, isto é, a resposta para todas as portas possui o mesmo comportamento. Para este

experimento, as duas portas possuem o mesmo comportamento em termos de magnitude e frequência com diferença apenas de 0,018 dB e 60 kHz entre elas.

Na Tabela 1 são apresentadas as magnitudes do coeficiente de reflexão, as médias dos valores mínimos e os desvios padrões para as portas 1 e 2, nas respectivas frequências de operação para o sensor sem líquido depositado em sua superfície.

Tabela 1: Valores mínimos da magnitude do coeficiente de reflexão, média dos valores mínimos e desvio-padrão, nas respectivas frequências de operação.

	Porta 1		Porta 2	
	Valor Mínimo (dB)	Frequência de Operação (MHz)	Valor Mínimo (dB)	Frequência de Operação (MHz)
Medição 1	-1,305	118,75	-1,284	118,75
Medição 2	-1,301	118,79	-1,282	118,79
Medição 3	-1,296	118,74	-1,280	118,66
Medição 4	-1,293	118,75	-1,277	118,68
Medição 5	-1,291	118,74	-1,276	118,69
Média	-1,296	118,74	-1,278	118,68
Desvio Padrão	0,0055	0,0207	0,0033	0,0541

Fonte: Autoria própria.

Conforme apresentado na Tabela 1, sem adição de líquidos ao sensor, foram obtidas médias da magnitude do coeficiente de reflexão S_{11} de -1,296 dB ($\sigma = 0,0055$) na porta 1 e de -1,278 dB ($\sigma = 0,0033$) na porta 2 para as respectivas frequências de ressonância. Comparando-se esses resultados com os de outros trabalhos realizados para as mesmas medições nota-se que foram obtidos valores da mesma ordem de grandeza. Além disso, percebe-se que o sensor a ondas de Love possui o mesmo formato de curva na faixa de frequência de 100 MHz e 130 MHz (SILVA et al, 2022; ANDRADE et al, 2022; TAMARIN, 2020).

Na Fig. 3 é apresentada a carta de Smith. As curvas mostradas representam a variação da impedância com a frequência.

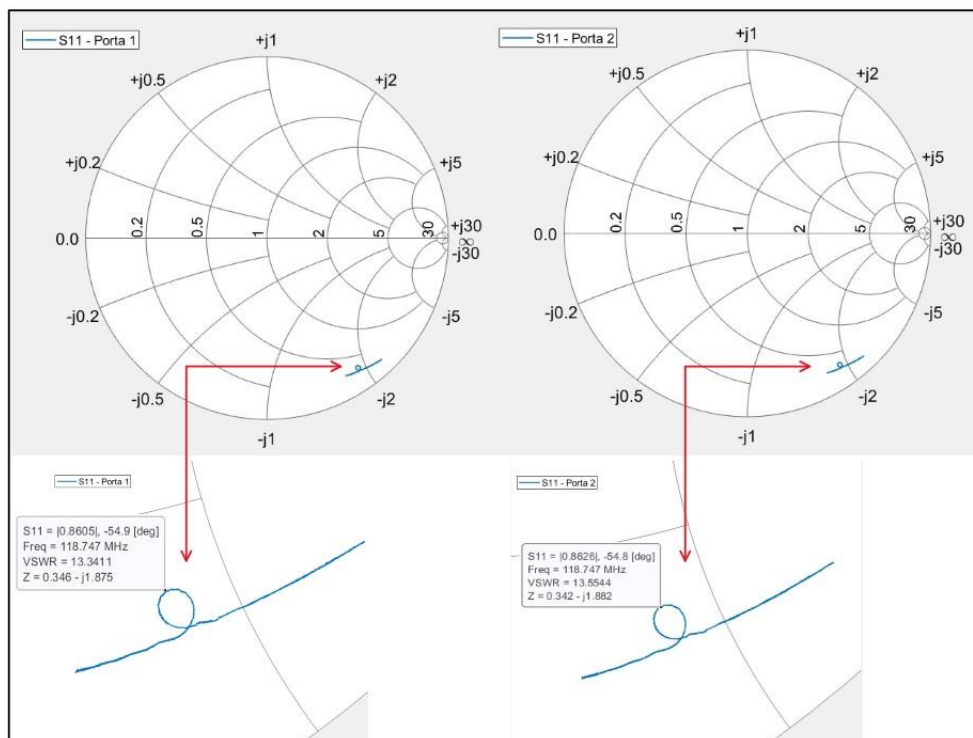


Figura 3 – Cartas de Smith para os coeficientes de reflexão das portas 1 e 2 do sensor a ondas de Love destacando as documentações nos pontos das frequências de operação.
Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 2 estão apresentados os valores das impedâncias na frequência de operação do sensor para as portas 1 e 2, bem como suas médias e os desvios padrões das amostras.

Tabela 2: Impedâncias das medidas, médias e desvios padrões das amostras na frequência de operação nas portas 1 e 2.

	Porta 1	Porta 2
	Impedância	Impedância
	(Ω)	(Ω)
Medição 1	$Z_1 = 0,346 - j1,875$	$Z_1 = 0,342 - j1,882$
Medição 2	$Z_2 = 0,345 - j1,876$	$Z_2 = 0,341 - j1,882$
Medição 3	$Z_3 = 0,343 - j1,875$	$Z_3 = 0,338 - j1,877$
Medição 4	$Z_4 = 0,343 - j1,875$	$Z_4 = 0,339 - j1,880$
Medição 5	$Z_5 = 0,342 - j1,875$	$Z_5 = 0,338 - j1,880$
Média	$Z_M = 0,344 - j1,875$	$Z_M = 0,344 - j1,875$
Desvio Padrão	0,0008	0,0077

Fonte: Autoria própria.

O sinal negativo na parte complexa da impedância indica que a reatância é capacitiva e se deve à natureza construtiva dos IDT no sensor. Isso se reflete no comportamento da magnitude de (S_{11}), observável nas Figs. 2 e 3, cujos valores da reatância mudam com a frequência. É possível notar o comportamento similar a um filtro passa-faixas, em que a

frequência de operação é o ponto de menor reflexão e, conseqüentemente, maior transmissão. Na frequência de operação, alterações na impedância podem causar aumento ou diminuição da quantidade de sinal transmitido, respectivamente diminuindo ou aumentando a magnitude do S_{11} . Com isso é de se esperar que a adição de material (líquido) ao sensor induzirá variações significativas no valor da impedância e, conseqüentemente, na magnitude do coeficiente de reflexão. (RUBE et al, 2020; ANDRADE et al, 2022; TAMARIN et al, 2020)

Na Fig. 4 se observa a média da magnitude do coeficiente de reflexão S_{11} das cinco medidas para as portas 3 e 4 da célula de teste.

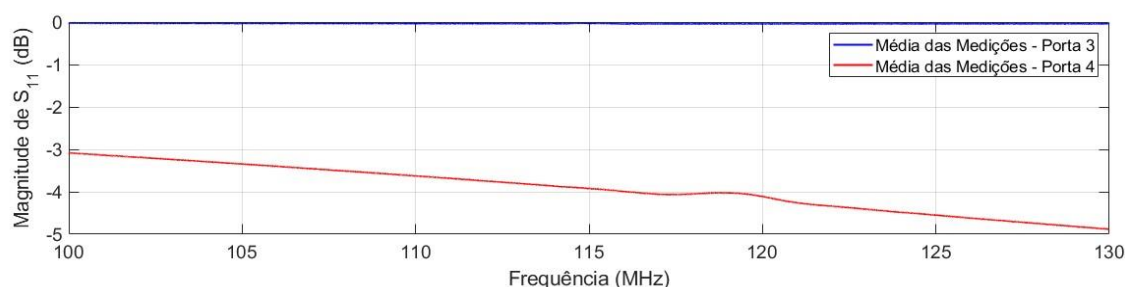


Figura 4 – Curvas das médias das medições para as portas 3 e 4.
Fonte: Autoria própria.

Com os valores de magnitude do coeficiente de reflexão (S_{11}) na porta 3 muito próximos a zero, conclui-se a existência de um circuito aberto. Dessa forma, quase todo o sinal incidente na porta 3 está sendo refletido. Na resposta da porta 4 é possível notar a tendência capacitiva do sensor no formato da curva, que cai ao longo do intervalo.

São mostradas na Tabela 3 as magnitudes do coeficiente de reflexão, as médias dos valores e os desvios padrões para as portas 3 e 4, nas respectivas frequências de operação para o sensor sem líquido depositado em sua superfície.

Tabela 3: Valores da magnitude do coeficiente de reflexão, médias e desvio-padrão, nas respectivas frequências de operação.

	Porta 3		Porta 4	
	Magnitude (dB)	Frequência de Operação (MHz)	Magnitude (dB)	Frequência de Operação (MHz)
Medição 1	0,004	114,78	-4,018	119,05
Medição 2	-0,030	114,73	-4,020	118,77
Medição 3	-0,025	114,47	-4,019	119,05
Medição 4	-0,023	114,61	-4,015	118,92
Medição 5	-0,020	114,58	-4,011	118,69
Média	-0,021	114,58	-4,018	119,05
Desvio Padrão	0,0133	0,1234	0,0036	0,1630

Fonte: Autoria própria.

Da Tabela 3 se observa que a média da magnitude do coeficiente de reflexão (S_{11}) é de -0,021 dB ($\sigma = 0,0133$) para a frequência de operação em torno de 114,58 MHz. Para a porta 4 se observa uma média da magnitude do coeficiente de reflexão (S_{11}) de -4,018 dB ($\sigma = 0,0036$) para a frequência de operação em torno de 119,05 MHz. Associando essas informações com a Fig. 4, nota-se a existência de um circuito aberto na porta 3.

As respostas das portas 3 e 4 do sensor a ondas de Love podem ser associadas por um casamento de impedâncias a partir de seus circuitos LC. Portanto, dada a característica de circuito aberto para a porta 3, pode-se inferir que a resposta da porta 4 é influenciada pelas impedâncias associadas e possui forma e valores diferentes das portas 1 e 2.

Na Fig. 5 pode ser vista a carta de Smith a partir dos parâmetros-S para as portas 3 e 4.

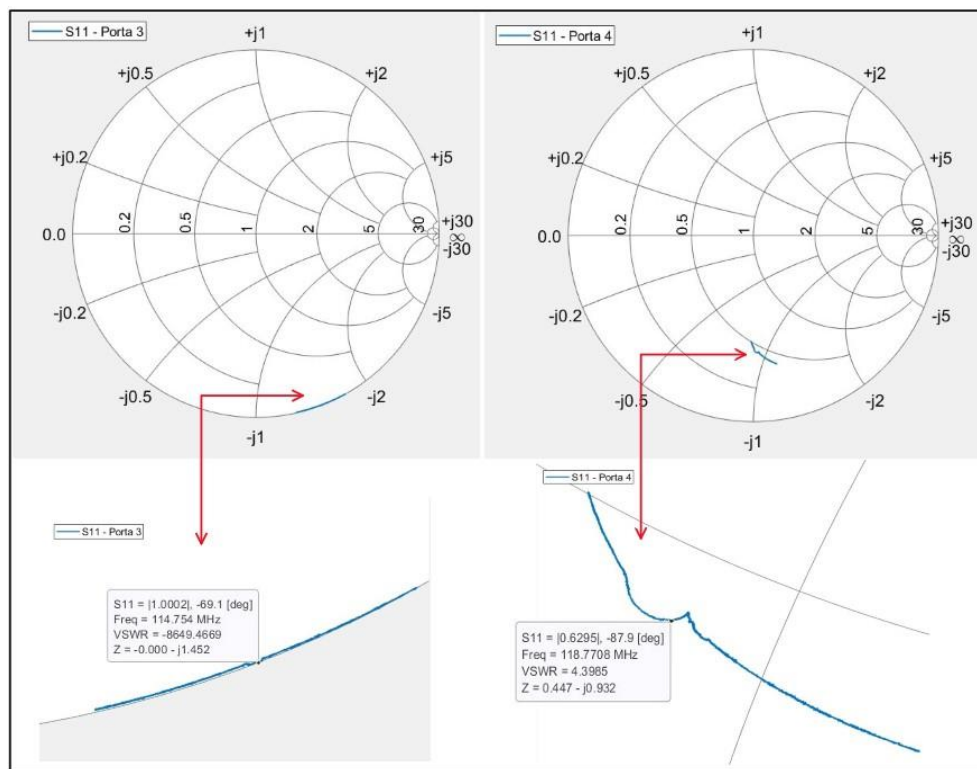


Figura 5– Cartas de Smith para os coeficientes de reflexão das portas 3 e 4 do sensor a ondas de Love destacando as documentações nos pontos das frequências de operação.

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 4 tem-se os valores das impedâncias na frequência de operação do sensor para as portas 3 e 4, bem como suas médias e os desvios padrões das amostras.

Tabela 4: Impedâncias das medidas, médias e desvios padrões das amostras na frequência de operação nas portas 3 e 4.

	Porta 3	Porta 4
	Impedância (Ω)	Impedância (Ω)
Medição 1	$Z_1 = 0,000 - j1,452$	$Z_1 = 0,446 - j0,932$
Medição 2	$Z_2 = 0,005 - j1,441$	$Z_2 = 0,447 - j0,932$
Medição 3	$Z_3 = 0,004 - j1,446$	$Z_3 = 0,445 - j0,929$
Medição 4	$Z_4 = 0,006 - j1,444$	$Z_4 = 0,446 - j0,931$
Medição 5	$Z_5 = 0,004 - j1,444$	$Z_5 = 0,448 - j0,935$
Média	$Z_M = 0,004 - j1,440$	$Z_M = 0,446 - j0,932$
Desvio Padrão	0,0071	0,0022

Fonte: Autoria própria.

Como visto na Fig. 1(c), a célula de testes do sensor possui circuitos LC nas entradas 3 e 4. Na porta 3 foi observada a existência de um circuito aberto, cuja ocorrência se dá pela falta de um indutor e desfaz o arranjo LC. Isso é consequência dos valores de impedância obtidos para a porta 3 na frequência de ressonância, que é formada quase totalmente por reatâncias capacitivas. As impedâncias obtidas para a porta 4 têm seus valores de reatância capacitiva menos negativos do que os obtidos nas outras três portas. Isso acontece porque o indutor nessa porta atua em um circuito LC de casamento de impedâncias e compensação de reatância capacitiva.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi apresentada a avaliação do funcionamento das portas da célula de testes contendo o sensor a onda de Love. Para isso, foi realizado um experimento para a medição da magnitude do coeficiente de reflexão das quatro portas do dispositivo utilizando um analisador de rede vetorial portátil. As portas 1 e 2 do sensor exibiram o comportamento capacitivo esperado em toda a largura de banda. Nas portas 3 e 4 foram identificados a existência de um circuito aberto causado por uma danificação do circuito e uma compensação indutiva, respectivamente. Na sequência destes experimentos, visa-se uma análise e escolha da porta com melhor desempenho considerando a variação da impedância quando um líquido é adicionado na sua superfície. Posteriormente, pretende-se inserir esta célula em um sistema de teledetecção.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer às agências brasileiras FAPESQ/CNPq/PRONEX e IMS-Bordeaux pelo apoio. Agradecemos imensamente ao IFPE, COPELE/UFCEG e CAPES/COPEX por financiarem este projeto.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, M., FREIRE, R. C. S., HALIL, H., TAMARIN, O., DEJOURS, C. **Remote Measurement of a VHF Love Wave Sensor for Liquid Detection.** WPW, 2022.

ANDRADE, M., FREIRE, R. C. S., SOUSA, M. G. A., JÚNIOR, P. F. S., HALIL, H., TAMARIN, O., DEJOURS, C. **Rectangular Microstrip Spiral Patch Antenna Applied to VHF Love Wave Sensor Interrogation.** INSCIT 2022.

BINU, D., KARIYAPPA, B.S. **A survey on fault diagnosis of analog circuits: Taxonomy and state of the art.** AEU - International Journal of Electronics and Communications, v. 73, P. 68-83, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2017.01.002>. Acesso em: 25 jul. 2022.

GOMBÉ, B.O., MÉROU, G.G., BRESCHI, K. et al. **A SAW wireless sensor network platform for industrial predictive maintenance.** Journal of Intelligent Manufacturing, v. 30, p. 1617–1628, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10845-017-1344-0>. Acesso em: 25 jul. 2022

POZAR, D.M. **Microwave Engineering.** 4ª Edição. John Wiley & Sons, New York, 2011.

RUBE, M., TAMARIN, O., SEBELOUE, M., HALLIL, H., LINGUET, L., REBÍERE, D., DEJOURS, C. **A dual Love wave and Impedance-based Sensor: Response Enrichment.** 2020 IEEE SENSORS. IEEE, 2020.

SILVA, H. D., FREIRE, R. C. S., ARAÚJO, J. F., ANDRADE, M. **Modelo de Circuito Elétrico Baseado nas Perturbações em um Sensor a Onda Acústica de Superfície a Partir do Coeficiente de Reflexão de Entrada.** Revista Física no Campus - UEPB, v. 2, n. 1, p. 22-31, Campina Grande - PB, 2022.

TAMARIN, O., RUBE, M., LACHAUD, J. L., RAIMBAULT, V., REBIERE, D., DEJOURS, C. **Mobile acoustic wave platform deployment in the Amazon river: Impact of the water sample on the love wave sensor response.** Sensors (Switzerland), vol. 20, no. 1, 2020.